

УДК 621.793

## ФОРМИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ

**М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, И.И. ТАРАН**

*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,*

*Минск, Беларусь*

**П.И. КОТ**

*Белорусский национальный технический университет,*

*Минск, Беларусь*

Одним из наиболее перспективных направлений развития материаловедения для транспортного машиностроения и аэрокосмической промышленности является изыскание путей замены металлических деталей на полимерные с металлическими покрытиями, что позволит значительно снизить массогабаритные характеристики изделий. При этом необходима разработка таких приемов формирования покрытий, которые бы обеспечили их толщину 0,2 – 1,5 мм при адгезии не ниже 4 МПа, т.е. позволили бы сохранить определенную механическую прочность.

Авторами данной работы предложена два варианта технологий формирования износостойких покрытий на полимерных деталях. В первом используется нанесение на подготовленную поверхность полимера покрытия из алюминия или его сплавов методом гиперзвуковой металлизации (ГМ), далее следует механическая обработка алюминиевого покрытия в необходимый размер, затем микродуговое оксидирование (МДО) алюминиевой поверхности, позволяющее модифицировать алюминий в корунд [1]. По второму варианту предусматривается формирование различных промежуточных слоев методом ГМ и окончательное нанесение стального износостойкого покрытия. Наибольшая твердость и износостойкость поверхностного слоя достигается при использовании первого варианта.

В отличие от многих других способов газотермического напыления, метод ГМ позволяет изменять состав распыляющего газового факела, увеличивая или уменьшая в горючей смеси количество окислителя. Как правило, в процессе ГМ используется факел, получаемый при горении смеси стехиометрического состава (соотношение объемов воздуха и пропана равно 22÷24:1), или при избытке окислителя (25÷27:1). Однако повышение окислителя (воздуха) вызывает увеличение количества оксидов, что категорически недопустимо при МДО алюминия и его сплавов, поскольку

снижается толщина оксидированного слоя и увеличивается продолжительность оксидирования.

Для определения необходимого состава газовой смеси распыляющего факела при ГМ были проведены исследования, позволившие оценить зависимость толщины и времени оксидирования покрытий от количества в них оксидов после напыления и соотношения газов в пропано-воздушной смеси. Соотношение воздуха и пропана выбирали, начиная с 15:1 — нижний предел воспламеняемости и горения пропана. Количество оксидов  $Al_2O_3$  оценивалось рентгеновским методом на дифрактометре ДРОН-3,0. Толщина оксидированного слоя определялась по поперечным шлифам. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Влияние соотношения газов, формирующих распыляющий факел при ГМ на параметры покрытия

Исследуемые параметры покрытия	Соотношение газов в смеси						
	15:1	16:1	17:1	18:1	19:1	20:1	21:1
К-во оксидов, об, %	2,8	3,0	3,2	3,5	4,2	6,1	7,6
Толщина оксидир. слоя после обработки в течение 1,5 ч., мкм	175	165	150	140	120	95	60

Анализ данных из таблицы 1 показывает, что наилучшие результаты (максимальная толщина покрытий при минимальном количестве оксидов) обеспечиваются при соотношении воздуха и пропана в смеси от 15:1 до 18:1.

Дальнейшие исследования позволили установить зависимость адгезии ГМ-покрытий из алюминия к поверхности термопластичных полимеров от размера распыленных частиц и температуры термоокислительной деструкции полимеров. Изменение (уменьшение или увеличение) размера распыляемых частиц алюминия осуществлялось изменением давления в камере сгорания газовой смеси установки АДМ-10 и применением инверторного источника «ESAB Varcior 503», обеспечивающего пульсирующий характер тока дуги. Размер частиц оценивали по стандартной методике (распыление в воду и последующий замер). При математической обработке этих результатов получена эмпирическая зависимость между величиной максимального размера распыленных частиц алюминия и температурой термоокислительной деструкции (см. формулу). При этом учитывались только те результаты, которые обеспечивали прочность сцепления покрытий с основой свыше 2,5 МПа:

$$d \leq k \ln(T_d) - N,$$

где  $d$  – размер распыленных частиц, мкм;  
 $T_d$  – температура термоокислительной деструкции полимера, °С;  
 $k$  – коэффициент, численно равный 62,5 мкм;  
 $N$  – коэффициент, численно равный 305 мкм.

Дальнейшие исследования были посвящены выбору материала подслоя, обеспечивающего наибольшую адгезию алюминиевого покрытия с полимерной подложкой. Установлено, что наибольшую прочность сцепления покрытия с основой (6–7,5 МПа) обеспечивает подслои из никеля, а наименьшую (2,5–3,5 МПа) — подслои из цинка. Максимальная величина прочности сцепления подслоя из цинка и алюмоцинка обеспечивается при давлении, подаваемом на распыление газа, 0,3 МПа, в то же время для никеля данная величина составляет 0,35 МПа.

Исследования влияния дробеструйной подготовки поверхности на прочность сцепления показали, что наибольшую адгезию обеспечивает дробь грануляцией 250 мкм. Причем эта величина соответствует для всех типов подслоя, а также для различных давлений газа, подаваемого на напыление.

Сравнительная оценка износостойкости оксидированных слоев и образцов из высокопрочного чугуна марки ВЧ50-7, закаленных путем нагрева газовым пламенем и охлаждением в масле до твердости 50–55 HRC, осуществлялась на машине трения АТВП. Установлено, что интенсивность изнашивания чугунных образцов при сухом трении составила от 320 до 400 мкм/км, что в 2 и более раз превышает интенсивность изнашивания оксидированного напыленного покрытия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Формирование металлических покрытий на полимерных материалах методом гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2018. — № 7. — С. 366–368.

Титульные листы презентаций докладов

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ»  
(«ИНТЕХМАШ – 20»)

**КОМБИНИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ.  
ФОРМИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА  
ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

***Белоцерковский М.А.***

*доктор технических наук, профессор,  
заведующий лабораторией "Объединенного  
института машиностроения" НАН Беларуси*



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ  
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ОАО «НПО «ЦЕНТР  
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПАРК  
ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

## Инновационные технологии в машиностроении

Электронный сборник материалов международной  
научно-технической конференции,  
посвященной 50-летию машиностроительных специальностей  
и 15-летию научно-технологического парка  
Полоцкого государственного университета  
(Новополоцк, 21-22 апреля 2020 г.)



Под редакцией  
чл.-корр. НАН Беларуси, д-ра техн. наук, проф. В. К. Шелега;  
д-ра техн. наук, проф. Н. Н. Попок

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет  
2020

УДК 621(082)

*Редакционная коллегия:*

Н. Н. Попок (председатель), В. П. Иванов (зам. председателя),  
Р. С. Хмельницкий (отв. Секретарь), А.В. Дудан, В. А. Данилов, Е.В. Бритик

***Инновационные технологии в машиностроении*** [Электронный ресурс] : электронный сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научно-технологического парка Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 21-22 апр. 2020 г. / Полоц. гос. ун-т ; под. ред. В. К. Шелега; Н. Н. Попок. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – 1 опт. диск (CD-ROM).

ISBN 978-985-531-691-7.

Отражены современное состояние и направления развития технологии и оборудования механической и физико-технической обработки; рассмотрены вопросы создания современных материалов, изготовления, восстановления и упрочнения деталей машин, автоматизации производства, эксплуатации и модернизации автомобилей и других машин.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов технических специальностей учреждений образования.

Прилагаются [титulyные листы презентаций докладов](#) участников конференции.

*Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса. Регистрационное свидетельство № 3141815008 от 28.03.2018.*

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь  
тел. 8 (0214) 59-95-53, e-mail: n.popok@psu.by

**№ госрегистрации 3141815008**

**ISBN 978-985-531-691-7**

© Полоцкий государственный университет, 2020

Для создания текстового электронного издания «Инновационный технологии в машиностроении» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

Компьютерный дизайн *Е. А. Балабуевой*  
Техническое редактирование и верстка *И. Н. Чапкевич*

---

Подписано к использованию 23.04.2020.  
Объем издания: 10,9 Мб. Тираж 3 диска. Заказ 264.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,  
г. Новополоцк,  
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44  
<http://www.psu.by>